

基于 LTCC 腔体结构的新型微波多芯片组件研究

严 伟, 孙兆鹏

(南京电子技术研究所, 江苏南京 210039)

摘 要: 传统的微波多芯片组件(MMCM)金属壳体气密封装存在需要增加重量、互连线和成本等缺点. 采用低温共烧陶瓷(LTCC)腔体技术为 MMCM 研制提供了一种实现微波互连基板和封装外壳一体化的理想解决方案. 本文采用微波分析软件对微波 LTCC 腔体及其过渡结构进行了仿真和优化, 并与 LTCC 腔体试验样品的测试结果进行了对比, 两者吻合较好. 采用微波 LTCC 腔体技术研制成功一个 X 波段 T/R 组件接收支路.

关键词: 低温共烧陶瓷; 腔体结构; 微波多芯片组件; 气密封装

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1862-05

Study on A Novel Microwave Multichip Module Based on LTCC Cavity Structure

YAN Wei, SUN Zhao-peng

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210039, China)

Abstract: The shortcomings of increasing weight, interconnecting lines and cost exist in traditional metal housing technique for hermetic packaging of microwave multichip modules(MMCMs). Low Temperature Co-fired Ceramics(LTCC)cavity technique is an excellent hermetic packaging solution to realize integration of microwave interconnecting substrate and packaging house for developing MMCMs. The microwave LTCC cavity structures and their transitions were simulated and optimized by the microwave analysis software in this paper. Good agreement was acquired between the simulated results and the experimental results. A X-band receive channel in transmit/receive(T/R) module was developed successful by LTCC cavity technique.

Key words: low temperature co-fire ceramic; cavity structure; microwave multichip module; hermetic packaging

1 引言

现代电子装备正朝着短、小、轻、薄和高可靠、高速度、高性能和低成本的方向发展,特别是机载、舰载和星载电子装备,以及便携式电子产品对体积、重量和可靠性的要求越来越苛刻,要求不断提高微波电路的组装与互连密度,实现微波电路的微型化、轻量化和高可靠,对微波组件及其微组装技术提出了更高的要求,因此,MMCM 技术得到了广泛研究和应用.在 MMCM 中,采用了大量微波单片集成电路(MMICs)和专用集成电路(ASICs)裸芯片,为了保证这些裸芯片的长期可靠性,通常采用金属外壳将 MMCM 封装起来,实现气密性并有效屏蔽外来电磁干扰.但是,传统的金属外壳应用到微波组件气密封装时具有重量较重、有些金属的热膨胀系数与微波电路板不匹配、微波输入/输出端引入的差损和驻波较大等缺点.采用铝碳化硅(AlSiC)等新型复合材料的金属封装外壳虽具有重量轻、热膨胀系数可控等

优点,但由于加工困难和价格昂贵,短期内难以在电子产品中广泛应用.

LTCC 技术提供了解决上述问题、且具有较低成本的一种较理想的方案^[1].利用 LTCC 技术可以实现互连基板和封装外壳一体化,在提高封装密度、减小体积、减轻重量的同时,改善微波特性、提高可靠性^[2~4],即利用 LTCC 腔体制作工艺,将 LTCC 既做为电路板、又做为封装外墙,把 MMICs 和 ASICs 裸芯片封装在 LTCC 腔体内,最后,用一块金属盖板将腔体气密封焊起来,就可以实现微波多芯片组件的气密封装.利用 LTCC 腔体技术实现 MMCM 的气密封装,可以进一步减小 MMCM 的体积和重量、降低成本,提高性能和可靠性.

2 微波 LTCC 腔体结构设计及制作

LTCC 腔体是指通过铸造、雕刻或光刻等方法在 LTCC 多层基板上制作形成的腔室. LTCC 腔体结构是进一步减小微波/毫米波组件体积、缩短传输线、简化互连

结构的一种重要结构形式^[5]. 常见的腔体结构有贯通型、单面型、双面型、台阶型、围框型和埋置型.

2.1 微波 LTCC 腔体结构设计

在 LTCC 腔体结构设计中,采用了单面型腔体和台阶型腔体相结合的结构,如图 1 所示,腔体位于微波 LTCC 多层基板的中间. 在腔体两侧基板和腔体内基板上上层布信号线,不同层的信号线之间用金属过孔垂直互连. 在腔体内放置多个 MMIC 芯片,在腔体上方用金属薄盖板对腔体进行气密封装. 根据微波多芯片组件的复杂程度,带腔体结构的微波 LTCC 多层基板的层数会有所差别,如图 1 所示结构中,在 LTCC 基板的第 5 层上面排布共面波导形式的信号线,在其第 1 层到第 10 层上制作腔体,第 11 层上面排布微带线形式的信号线用来连接电路中的 MMIC 芯片,共面波导和微带线之间用金属过孔来连接. 在 LTCC 基板的第 16 层下面全部印刷导体作为该组件的微波接地面. 由于要对腔体用金属盖板封焊,所以在 LTCC 基板上围绕腔体做了个金属化的环状台阶,盖板置于其上. 台阶的高度也是需要考虑的一个方面,为了减少台阶及盖板对金属过孔、微带线和和键合芯片的金丝的微波特性的影响,所以台阶应尽量高些,但台阶变高即相当于腔体的高度增大,这又增加了制作工艺的难度,降低了产品成品率,在兼顾这两方面情况下将台阶的高度设为 0.4mm,即基板的第 1 层到第 4 层.

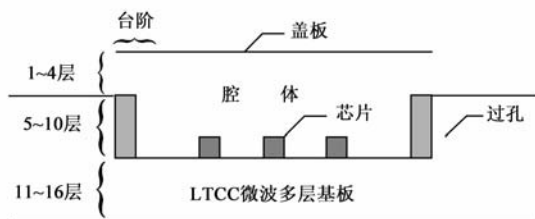


图1 LTCC气密封腔体结构示意图

2.2 带腔体结构的微波 LTCC 多层基板制作

微波腔体结构 LTCC 多层基板的制作采用标准的微波多层 LTCC 基板制作工艺,但在制作腔体时为了避免腔体变形,必须增加在腔体中放置具有一定强度而有弹性的嵌件等工艺流程,然后再进行层压.

嵌件的制作需要采用专用的嵌件模具,以获得与腔体尺寸匹配的嵌件. 采用与基板相同的生料带来制作模具,模具的尺寸与腔体尺寸相同,层数也一样. 嵌件模具经过层压后边缘产生变形,变形的大小取决于层压温度、压力和时间. 一系列的试验表明^[5]: 在常温(25℃)、1000psi(磅每平方英寸)下可以使嵌件模具变形最小.

在嵌件制造过程中,嵌件高度过高或过低都会使腔体产生变形,而且高度差越大,变形越大. 工艺试验表明:当嵌件高度比腔体高度低 0.02 ~ 0.05mm 时,腔体边缘基本无变形.

采用高度合适的嵌件和经过优化的制造工艺,得到了良好的 LTCC 腔体,腔体边缘无变形,烧结后采用 0.5%浓度的品红酒精溶液浸泡 2 小时,用肥皂水清洗干净,烘干后观察腔体边缘没有发现分层现象. 采用扫描电镜分析法观察腔体边缘也没有发现分层现象.

3 LTCC 腔体过渡结构的微波特性仿真及优化

腔体内、外 LTCC 微波电路之间的过渡结构是实现基于 LTCC 腔体结构的微波多芯片组件的关键. 本文研究采用了一种新型的微带线到共面波道(CPW)过渡的腔体结构,腔体内 LTCC 电路采用微带传输线,微带线与 MMIC 芯片之间利用金丝键合工艺实现互连;腔体外 LTCC 电路采用 CPW 直接与外部电路实现连接;腔体两侧的共面波导和微带线之间利用腔体壁上的金属过孔实现过渡. 在 LTCC 腔体过渡结构中影响电路传输性能的主要有两部分:一是腔体中连接两侧共面波导和微带线的过渡;二是腔体台阶的宽度和位置.

3.1 连接共面波导和微带线的腔体过渡结构微波特性分析

为了更好的分析连接共面波导和微带线的腔体过渡结构微波特性,我们先对微带线和共面波导在同一平面上的过渡结构进行研究,然后再对腔体过渡结构进行研究.

3.1.1 微带线和共面波导在同一平面上的过渡

在同一平面微波电路中微带线到共面波导的转换,虽然二者的特性阻抗相同,但由于二种传输线的宽度一般不相同,直接对接容易产生回波反射,使驻波比较大,因此,需要设计采用一种比较好的过渡形式,使驻波尽量小,实现微带线到共面波导的平稳转换. 为此先后仿真和试验了直线型、指数线型、改进指数线型、圆弧型、双圆弧型连接以及纵向移动共面波导两边地等各种过渡形式来优化出比较好的转换方式(均采用特性阻抗均为 50Ω 的微带线和共面波导来分析).

(1) 不同过渡形式的研究

用 ADS 软件中的 layout 对上述几种过渡形式的驻波和差损进行了仿真,发现圆弧型(cirque)、直线型(line)以及指数线型(exponent)连接比较具有代表性.

图 2(a)是在设定过渡带的长度为 1mm 情况下,对上述三种连接方式的驻波的仿真结果. 由图 2(a)可见:在以 10GHz 为中心的 2GHz 的带宽里,圆弧型连接方式驻波最小,可见这种连接是一种比较好的连接方式,这主要是因为如图 2(b)所示的连接方式中过渡带的场传播模式仍然是微带的模式,要使过渡带的特性阻抗接近其两侧的 50Ω 传输线从而使整个电路匹配,过渡带信号线在开始阶段的变化应该缓一点.

(2) 在同一种过渡形式中过渡带的长度对其性能

的影响

图3是过渡带长度不同时驻波仿真结果和过渡带分别为1mm与2mm的LTCC板实物样品的驻波测试结果.其中图3(a)是采用直线型连接方式,用ADS软件对在频率为9~11.6GHz频带长度分别为0.5mm,0.8mm,1mm,2mm的过渡带的时电路驻波仿真结果,图3(a)中只示意了这四者区分比较明显的频率为10.4~11.6GHz的一段.

由图3(a)仿真结果比较可见:在10GHz中心频率的1GHz频带宽度的范围内,过渡带的长度为0.8mm时性能较好,由此可见过渡带过短或过长都会使电路的传输性能变差,驻波变大.这主要是因为过渡带过短就类似于直接对接了,容易产生反射;由于过渡带信号线宽度变化所以它的特性阻抗不能与两边的特性阻抗为50Ω的器件匹配从而使信号不能均匀传输,当过渡段过

长时这种不匹配就体现的愈明显,从而造成传输性能变差.

为此我们又制作出LTCC板实物来验证仿真结果.图3(b)为过渡带长度为1mm和2mm的LTCC板实物样品用矢量网络分析仪对电路的驻波进行测试得到的驻波随频率变化的结果.由图3(b)测试结果比较可见过渡带长度为1mm时驻波要比2mm时小得多,实际测量结果与理论仿真结果基本吻合.

3.1.2 腔体过渡结构中通孔与微带线和共面波导之间的连接

在实际腔体过渡结构中,微带线连接到同一个平面上的通孔表面过渡线,通孔表面过渡线再通过位于腔体壁上的通孔连接到另一个平面上的通孔表面过渡线,通孔表面过渡线再连接到同一个平面上的共面波导(如图4所示).

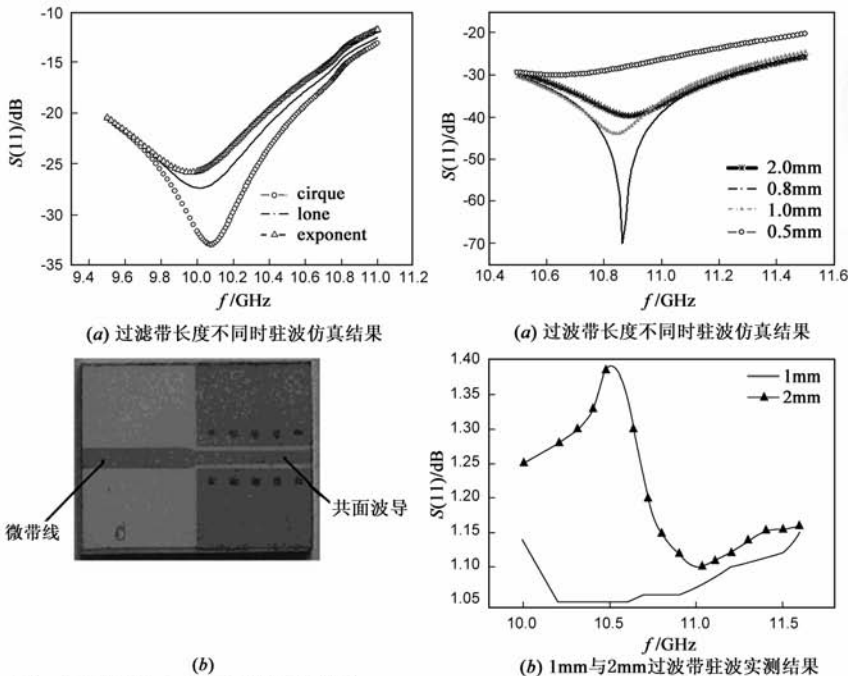


图2 不同连接方式的驻波仿真结果

根据参考文献[6],垂直通孔与通孔表面过渡线之间的连接采用在垂直通孔与微波传输线的连接处适当扩展微波传输线(圆环状,类似焊盘状),有助于把电磁场信号导入垂直通孔和下面的微波传输线,改善微波传输性能.微带线连接到同一个平面上的通孔表面过渡线采用直接对接就可以获得较好的微波传输性能.

根据上节分析,共面波导到同一平面上的微带线的过渡采用圆弧型的过渡结构较好,对共面波导到同一个平面上的通孔表面过渡线之间的连接,也采用圆弧型连接和直接对接两种方法进行分析比较,图4(a)和(b)是这两种连接方式的示意图.

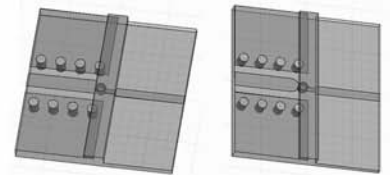


图4 两种连接方式及其驻波随频率变化仿真结果

用HFSS软件对图4(a)和(b)所示两种结构在9~11GHz的频带内进行三维电磁场仿真,得到如图4(c)所示的驻波随频率变化的比较图,由图可见采用圆弧型过渡比直接对接方式的驻波小,这也再次印证了上节分析的结论.因此,在最终的共面波导到同一平面上的通孔表面过渡线之间的连接就采用了圆弧型的过渡结构.

3.2 腔体台阶的宽度和位置的微波特性仿真及优化

腔体结构中,腔体台阶的宽度和位置对整个微波多芯片组件的微波性能都会产生一定的影响.首先分

析腔体台阶宽度(W)的影响,如图 5(a)所示,设定其值分别为 2mm 和 4mm.采用三维电磁场仿真软件 HFSS 对这两种台阶宽度在频率为 9~11GHz 的频带内的驻波进行仿真,得到驻波随频率变化的比较图(如图 5(c)所示),由图 5(c)可明显看出台阶变宽后驻波变大,性能变差.但是台阶太窄又会受到制造工艺的限制,因此,综合考虑将台阶宽度确定为 2mm.

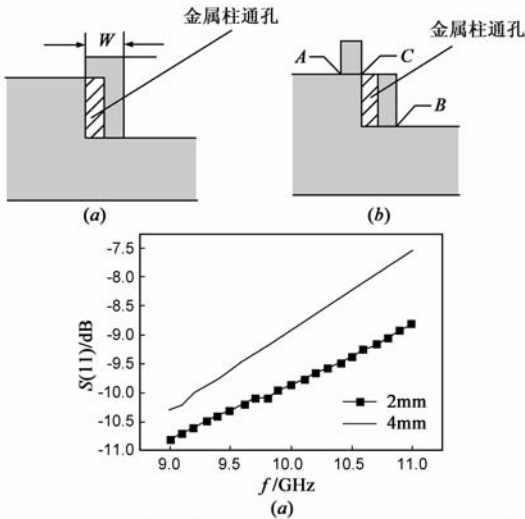


图5 两种台阶结构及不同台阶宽度的驻波仿真结果

对于台阶的位置,针对图 5(a)和(b)的两种情况进行比较.两图的共同之处在于都需要对由金属过孔带来的电路阻抗不匹配进行补偿,图 5(a)在金属过孔两侧的补偿都不会受到台阶上方金属盖板的影响,但图 5(b)中在过孔上端(即 C 处)的补偿线的出现会使台阶左移而且更重要的是补偿线会受到上方金属盖板的很大影响而使补偿不易准确,就需要对补偿线不断的修正、试验和仿真而使过程十分繁琐,虽然可以进行改进,把图 5(b)电路 A~B 这一段作为一个整体来进行仿真然后进行补偿,但由于图中 AC 段信号线为带状线,A 左侧为共面波导,二者虽然都是 50Ω 的特性阻抗线但信号线的宽度却不同,这样信号传输时容易产生回波反射而影响传输性能.而图 5(a)则可以省去这个环节,所以最终我们采用了图 5(a)所示的台阶结构.

3.3 完整腔体结构分析

把图 4(b)腔体过渡结构的仿真结果 S 参数值的 s2p 数据导入 ADS 界面里的 SNP1 中,对完整腔体结构传输电路进行补偿(要注意的一点是右侧的 SNP1 两个端口接入电路的方式和左侧 SNP1 的连接方式是相反的),这就需要在 SNP1 的两侧都施加补偿线,用 Tune Parameters 调谐按钮来调谐观察驻波随补偿线的长度和宽度的变化情况,发现不需要在图 5(b)的共面波导层面上加补偿线,只需要在腔体内的微带线层加补偿线即可.调节线的宽度和长度达到在 9~11GHz 的频带内

驻波在 -20dB 以下,但实际调谐结果发现在这么宽的带宽里无法达到最初设想的指标,就取性能比较好的一种情况(在 9GHz 到 9.8GHz 频率范围内性能较好的一段)对其优化,得到最终补偿线的长度为 2.2mm,宽度为 2mm.

在 ADS 的仿真结果中达到设计要求后,将补偿结果及整个腔体过渡结构用 AutoCAD 画图导入 HFSS 中,同时还需要在微带信号线两侧再“补”上一段顶端与台阶顶端平齐的 LTCC 基板来形成腔体结构,为使微带线电磁场传播不受两侧基板的影响,所以腔体在垂直于信号线方向的宽度要大于微带线宽度的 7~10 倍,微带线宽度为 0.88mm,这样设置腔体宽度为 17mm 就达到了要求.在满足上述要求后得到如图 6(a)所示补偿后的该过渡结构立体示意图,对该电路的 S 参数再进行仿真,得到图 6(c)中所示的 HFSS 仿真结果.

为了验证仿真结果,采用标准的 LTCC 制作工艺制作了如图 6(b)所示的基于腔体结构的微波传输电路实物样品,用矢量网络分析仪和微波探针台对这种微波传输结构进行了电性能测试以验证仿真分析的正确性.测试结果如图 6(c)所示,测试结果和仿真结果基本吻合,但有一点偏移,主要原因是 LTCC 基板的相对介电常数标称值和实际值会有 0.3 左右的误差所致.

4 基于 LTCC 腔体结构的 MMCM 研制

采用 LTCC 腔体结构研制了一种 X 波段 T/R 组件中的接收支路 MMCM,它由两级低噪声放大 MMIC 芯片和一级电控衰减器 MMIC 芯片(夹在两级低噪声放大 MMIC 芯片之间)组成.其中,低噪声放大 MMIC 芯片为正电源供电,电控衰减器 MMIC 芯片有 10 根馈电线,衰减量控制信号通过限流电阻传输高电平或低电平到电控衰减器 MMIC 芯片来控制其衰减状态.

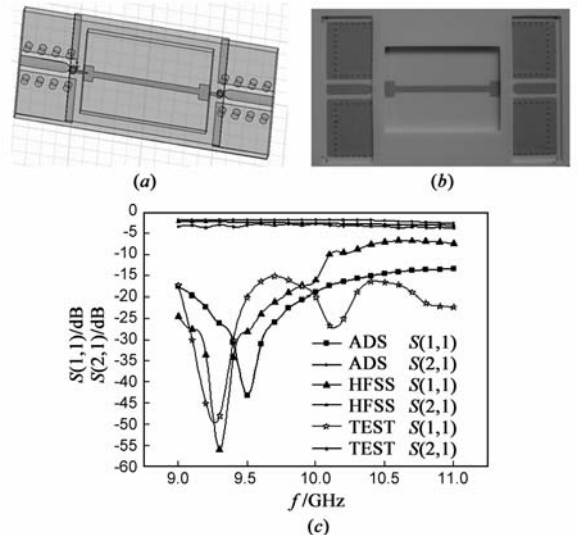
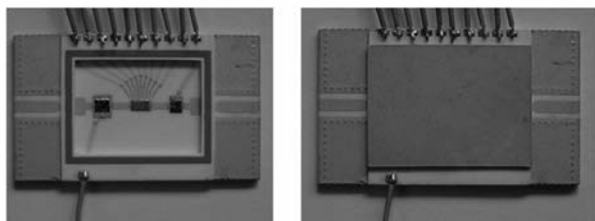


图6 完整腔体结构示意图和实物图、仿真和测试结果

X 波段接收支路 MMCM 采用 Ferro-A6 型 LTCC 微波多层互连基板, 限流电阻阻置在 LTCC 微波多层互连基板内层, 接地线通过金属过孔连到底层的地上. 采用环氧导电胶粘结工艺将 MMIC 芯片粘结到 LTCC 多层互连基板上. 为了保证 MMCM 的电性能和可靠性, 必须保证粘接到 LTCC 基板上的 MMIC 芯片是确好芯片 (KGD). 因此, 在 MMIC 芯片装配前, 先采用矢量网络分析仪、微波探针测试台和共面波导微探针组成的 MMIC 芯片测试系统对 MMIC 芯片进行无损伤电性能参数测试, 筛除不合格 MMIC 芯片, 得到确好芯片. 采用上述方法研制出的 X 波段 T/R 组件中的接收支路 MMCM 样品如图 7 (a) 和 (b) 所示, 对它们的性能参数进行了测试, 其带宽达到了 1.6GHz, 增益 $\geq 28\text{dB}$, 噪声系数 $\leq 2\text{dB}$, 输入/输出驻波 ≤ 1.9 , 而且其增益曲线和噪声系数比较平坦, 达到了设计要求. 此外, 采用氦质谱检漏仪检测其气密性, 达到了 $1 \times 10^{-8} \text{KPa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$, 也完全满足了工程应用的要求.



(a) 未封盖

(b) 封盖后

图7 腔体结构MMCM

5 结论

采用基于 LTCC 腔体结构的微波多芯片组件技术研制的新型微波多芯片组件具有体积小、重量轻和微波性能良好等技术特点. 该技术对于研制体积和重量要求苛刻的新型机载与星载电子装备等具有重要意义, 同时对于降低组件成本、实现固态有源相控阵雷达 T/R 组件的大批量应用也具有重要意义. 在研制三维微波组件^[7,8]、系统级微波组件^[9,10]等新一代微波组件中具有广泛的应用前景.

参考文献:

- [1] R Rieger, B Schweizer, H Dreher, M Adolph, et al. Highly integrated cost-effective standard X-band T/R module using LTCC housing concept for automated production [A]. Proceedings of 2002 European SAR Conference Proceedings [C]. Cologne, Germany: VDE VERLAG GMBH Berlin Offenbach, 2002. 303 - 306.
- [2] Tsang-Der Ni, James DeMarce, Dana Sturzebecher, Mike Cummings. High frequency hermetic packages using LTCC [A]. Proceedings of 1996 IEEE MTT-S Digest [C]. USA: IEEE Press, 1996. 1627 - 1630.
- [3] A Panther, A Petosa, M G Stubbs, K Kautio. A wideband array

of stacked patch antennas using embedded air cavities in LTCC [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(12): 916 - 918.

- [4] Jong-Gwan Yook, Nihad I Dib, Eray Yasan, Linda P B Katehi. A study of hermetic transitions for microwave packages [A]. Proceedings of 1995 IEEE MTT-S Digest [C]. USA: IEEE Press, 1995. 1579 - 1582.
- [5] 孙兆鹏. 基于 LTCC 的三维微波垂直互连技术 [D]. 南京: 南京电子技术研究所, 2007.
- [6] 严伟, 洪伟, 薛羽. 低温共烧陶瓷微波多芯片组件 [J]. 电子学报, 2002, 30(5): 711 - 714.
YAN Wei, HONG Wei, XUE Yu. LTCC microwave multichip modules [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(5): 711 - 714. (in Chinese)
- [7] Axelsson K. Generic packaging technologies for T/R-modules [A]. Proceedings of 2005 European Microwave Conference [C]. Paris, France: IEEE Press, 2005. 805 - 808.
- [8] 严伟, 禹胜林, 房迅雷. 基于 LTCC 技术的三维集成微波组件 [J]. 电子学报, 2005, 33(11): 2009 - 2012.
YAN Wei, YU Sheng-lin, FANG Xun-lei. Three dimensional integrated microwave modules based on LTCC technology [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11): 2009 - 2012. (in Chinese)
- [9] Eli Brookner. Phased-array radars: past, astounding breakthroughs and future trends [J]. Microwave Journal, 2008, (1): 30 - 50.
- [10] Yan Wei, Sun Zhaopeng, Yu Shenglin, Xie Lianzhong. Development of microwave hermetic packages using cavity in LTCC for phased-array antenna [A]. Proceedings of 2009 IET International Radar Conference [C]. Guilin, China: the Institute of Engineering and Technology, 2009. 86 - 87.

作者简介:



严伟 男, 1965 年生于安徽蚌埠, 博士, 研究员, 现为南京电子技术研究所天线微波与微电路研究部副部长兼微电子制造中心主任. 研究兴趣为微波技术和微组装技术.

E-mail: yanwei5100@126.com



孙兆鹏 男, 1979 年生于山东烟台, 硕士, 助理工程师. 研究兴趣为微波器件和组件技术及其应用.

E-mail: asmaomi@yahoo.com.cn